UJT en PUT

Tegenwoordig wordt wel eens vergeten dat het analoge tijdperk prachtige componenten heeft voortgebracht waarmee u nog steeds leuke experimenten kunt uitvoeren. Wij stellen u voor aan de UJT en de PUT, twee van die componenten die gelukkig nog wél leverbaar zijn.

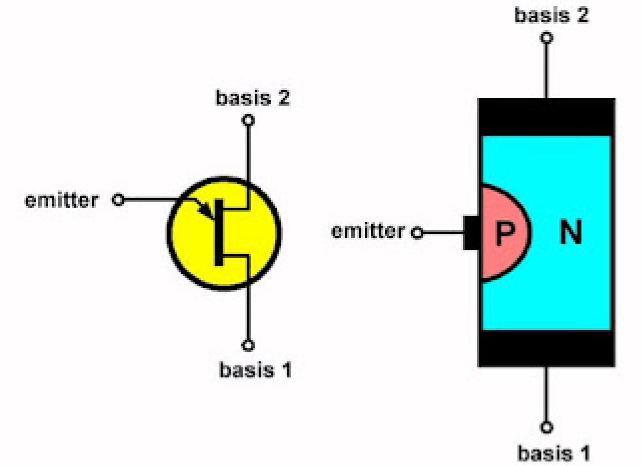
Auteur: Jos Verstraten, Landgraaf, Nederland
Email: josverstraten@live.nl

Publicatiedatum: 08-01-2018

De UJT, uni-junction transistor

Wat is een UJT?

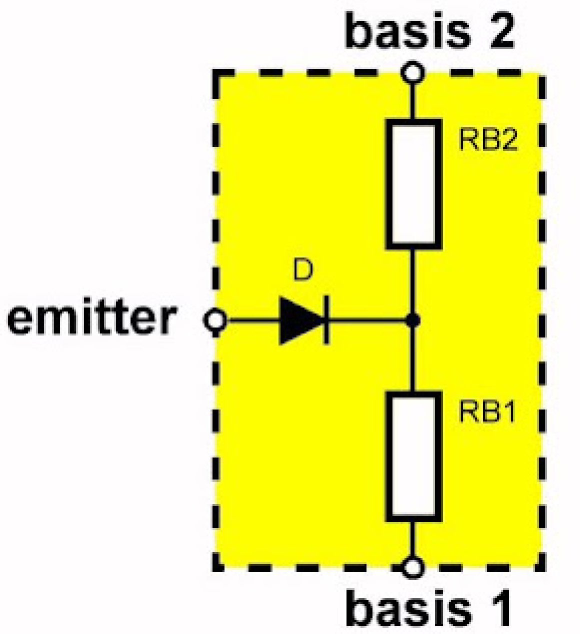
UJT is het letterwoord van '**U**ni-**J**unction **T**ransistor' hetgeen in het Nederlands betekent *'transistor met slechts één sperlaag'*. Het symbool en de samenstelling van een dergelijke halfgeleider zijn in onderstaande figuur weergegeven. Het onderdeel heeft een aansluiting die E (emitter) wordt genoemd en verder twee B-aansluitingen (basissen) met als benaming B1 en B2. Zoals uit de rechter tekening blijkt is een UJT opgebouwd uit slechts één halfgeleidende overgang, tussen de E en het materiaal van de twee B-aansluitingen.



Het symbool en de samenstelling van een UJT. (© 2018 Jos Verstraten)

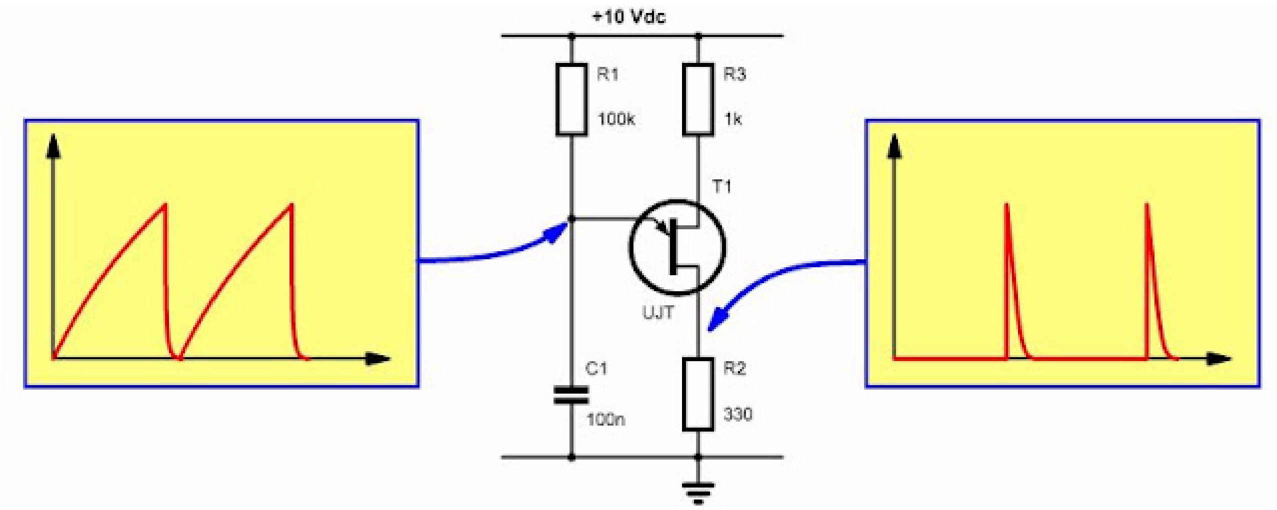
Vervangingsschema

Voor een beter begrip van de werking is het vervangingsschema van onderstaande figuur belangrijk. Dit bestaat uit één diode (vandaar de naam UJT) en twee weerstanden. B1 wordt gewoonlijk aan de negatieve pool van een spanningsbron aangesloten, B2 aan de positieve. Als u de emitteraansluiting open laat, werken de beide interne weerstanden als een gewone spanningsdeler. De totale waarde van beide weerstanden bedraagt ongeveer 5 kΩ tot 10 kΩ. Legt u op de emitter een spanning aan die groter is dan de spanning op het knooppunt van de beide weerstanden en de diode, dan ontstaat het *'UJT-effect'*. Weerstand RB1 wordt dan tot vrijwel nul gereduceerd en het knooppunt van de beide weerstanden komt aan het meest negatieve potentiaal te liggen.



Het vervangingsschema van een UJT bestaan uit slechts één diode en twee weerstanden. (© 2018 Jos Verstraten)

Het voordeel van het 'UJT-effect'
Wat u met deze speciale eigenschap van een UJT in de praktijk kunt aanvangen volgt het best uit een praktische schakeling waarin een UJT de hoofdrol speelt. Het schema is in onderstaande figuur getekend. Op de emitter is een condensator C1 aangesloten die via een weerstand R1 van 100 kΩ uit de positieve voedingsspanning wordt opgeladen. De condensator gaat dus langzaam opladen van 0 V naar de waarde van de positieve voedingsspanning, in dit geval 10 V. Bereikt de spanning op de condensator de spanning op het knooppunt van de beide interne weerstanden RB1 en RB2, dan wordt de weerstand tussen E en B1 vrijwel gelijk aan nul. De condensator zal zich nu snel ontladen via de overgang E-B1 en de weerstand R2 van 330 Ω. Als de condensator ontladen is kan er geen stroom meer door de emitter lopen, waardoor RB1 weer zijn gewone waarde aanneemt. De condensator C1 kan zich weer opladen en hetzelfde spelletje herhaalt zich weer. De 330 Ω weerstand in de B1-aansluiting dient alleen maar om de emitterstroom te begrenzen. Tijdens de ontlading van de condensator ontstaat over de weerstand een naaldvormige impuls. Op de condensator zélf is een vrijwel zaagtandvormige spanning beschikbaar als gevolg van de langzame op- en snelle ontlading van de condensator.



Aan de hand van deze eenvoudige toepassing kunt u de werking van de UJT doorgronden. (© 2018 Jos Verstraten)

De η-factor
De triggerspanning van de UJT wordt bepaald door de verhouding van de beide weerstanden uit de bovenstaande figuur. Deze zogenoemde η-faktor (Griekse letter èta) geeft aan bij welk

deel van de voedingsspanning de UJT zal triggeren.

Het voordeel van een UJT
Het grote voordeel van de UJT is dus dat u er op een heel eenvoudige manier een praktisch bruikbare laagfrequent oscillator mee kunt maken. Met zo'n oscillator kunt u bijvoorbeeld de triggerpulsen voor een triac of een thyristor genereren. Vergeleken met de standaard schakeling met een timer van het type 555 bespaart u een paar onderdelen.

Beschikbare typen van UJT's

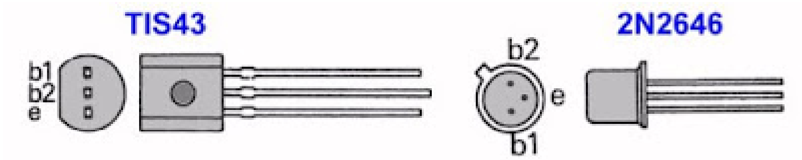
Opmerking
Er zijn niet erg veel fabrikanten die UJT's op de markt hebben gebracht. Tóch zijn het blijvertjes, want de meeste UJT's worden nog steeds gefabriceerd en zijn tamelijk goedkoop verkrijgbaar. In de twee volgende paragraafjes worden de twee typen beschreven, die u het vaakst in (oude) zelfbouwschakelingen in de internationale elektronica literatuur zult aantreffen.

De TIS43
De TIS43 van Texas Instruments is een PN silicium uni-junction transistor voor toepassingen in laagfrequent impulsgeneratoren en stuurkringen voor triac's.

- **Richtprijs:** ongeveer € 0,80
- **Behuizing:** TO-92
- **Aansluitgegevens:** zie onderstaande figuur
- **Maximale basis1/basis2 spanning:** 30 V
- **Maximale continue emitterstroom:** 50 mA
- **Maximale piek emitterstroom:** 1 A
- **η-factor:** 0,55 - 0,82
- **Maximaal vermogen:** 360 mW

De 2N2646
De 2N2646 van Comset Semiconductors is een PN silicium uni-junction transistor voor toepassingen in LF-impulsgeneratoren en stuurkringen voor triac's.

- **Richtprijs:** ongeveer € 2,81
- **Behuizing:** TO-18
- **Aansluitgegevens:** zie onderstaande figuur
- **Maximale basis1/basis2 spanning:** 35 V
- **Maximale continue emitterstroom:** 50 mA
- **Maximale piek emitterstroom:** 2 A
- **η-factor:** 0,56 - 0,75
- **Maximaal vermogen:** 300 mW

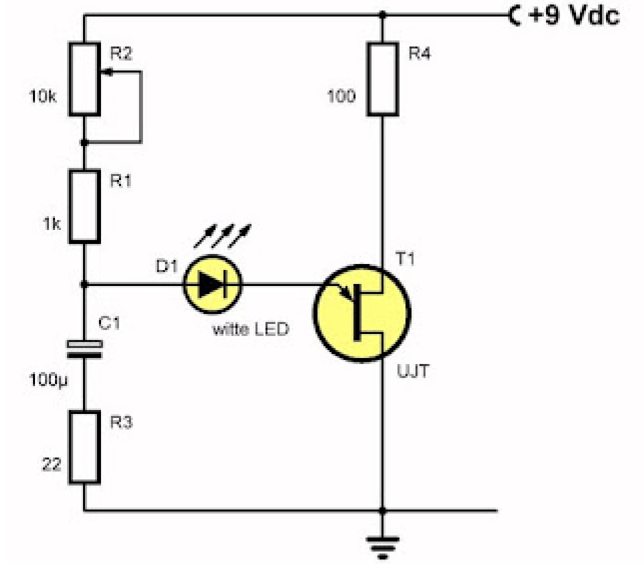


Aansluitgegevens van de TIS43 en de 2N2646.
(© Texas Instruments en Comset Semiconductor)

Voorbeeldschakelingen met UJT's

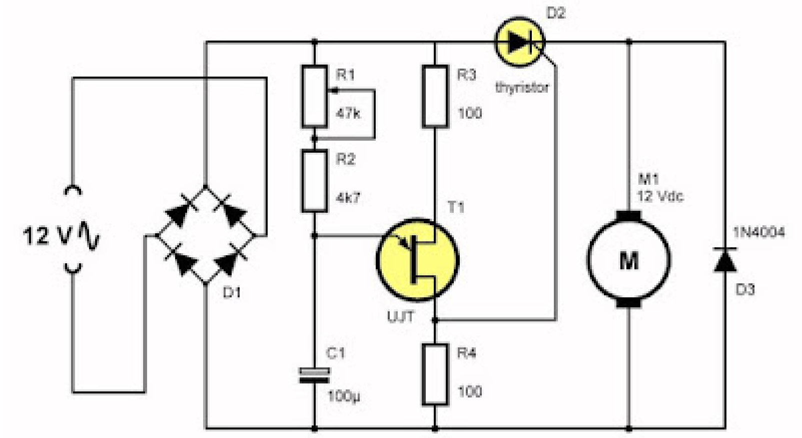
Knipperende LED
Met het schema van onderstaande figuur kunt u van een normale LED een knipperende LED

maken. De werking zal wel duidelijk zijn. De condensator C1 wordt opgeladen uit de voedingsspanning via de weerstand R1 en de potentiometer R2. De instelling van dit laatste onderdeel bepaalt de knipperfrequentie. Als de spanning op de emitter gelijk wordt aan de B1/B2-spanning slaat de UJT door en wordt de condensator snel ontladen via de LED D1. De weerstand R3 zorgt voor de noodzakelijke begrenzing van de stroom.



Het laten knipperen van een LED met een UJT. (© 2018 Jos Verstraten)

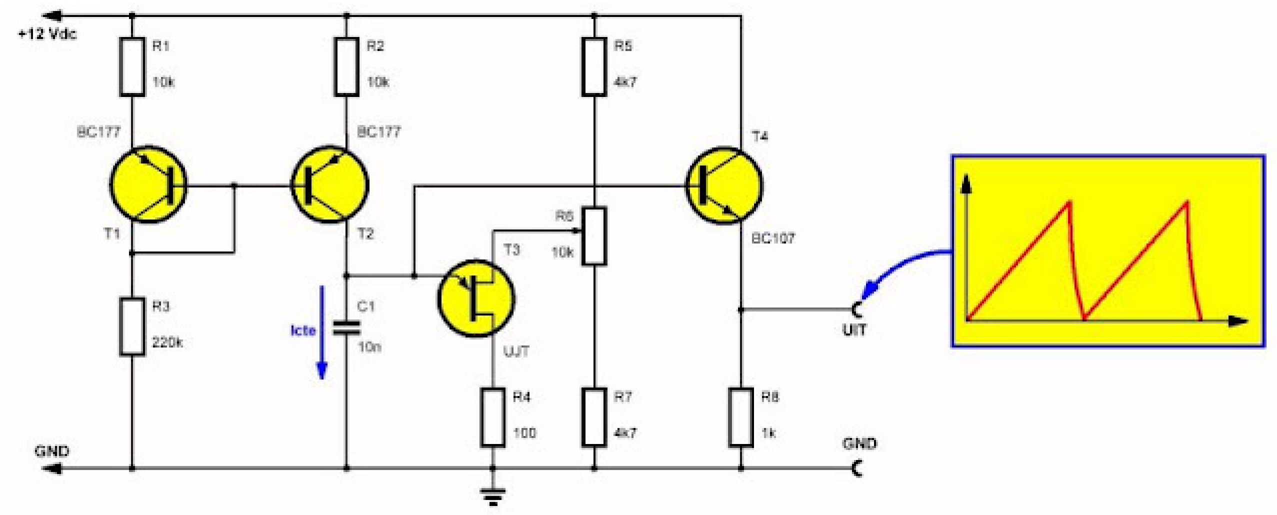
Snelheidsregeling van een gelijkstroommotor
De smalle positieve pulsjes die op de B1 van een UJT ontstaan zijn ideaal voor het sturen van een thyristor. Hiervan wordt in onderstaande schakeling gebruik gemaakt voor het regelen van de snelheid van een gelijkstroommotor. De schakeling wordt gevoed met 12 V wisselspanning die door middel van de bruggelijkrichter D1 wordt gelijkgericht. Nadien volgt de reeds bekende schakeling rond de UJT T1. Over de weerstand R4 ontstaan smalle positieve pulsjes. De vertraging van die pulsjes ten opzichte van de nuldoorgang van de voedingsspanning wordt bepaald door de instelling van de potentiometer R1. De smalle pulsjes sturen de thyristor D2 in geleiding. Afhankelijk van de tijdvertraging tussen de nuldoorgang van de wisselspanning en de pulsjes wordt de motor M1 met minder of meer spanning gestuurd. De diode D3 sluit de hoge temk kort die over de motor kan ontstaan bij het wegvallen van de voedingsspanning en die de halfgeleiders zou kunnen vernielen.



Het regelen van de snelheid van een gelijkstroommotortje. (© 2018 Jos Verstraten)

Eenvoudige zaagtandgenerator
In onderstaand schema wordt een UJT ingezet voor het genereren van een lineair stijgende spanning, een zaagtand dus. De transistoren T1 en T2 vormen een constante stroombron. De stroom I_{cte} laadt de condensator C1 op. Als een condensator wordt opgeladen met een constante stroom zal de spanning over dit onderdeel lineair stijgen. De UJT is aangesloten over de condensator. Op een bepaald moment slaat de UJT door en de condensator wordt zeer snel ontladen via de UJT en de kleine weerstand R4. De condensatorspanning wordt aangeboden aan de basis van de als emittervolger geschakelde transistor T4. Over de emitterweerstand R8 kunt u de zaagtand aftakken voor het doel waarvoor u een zaagtand

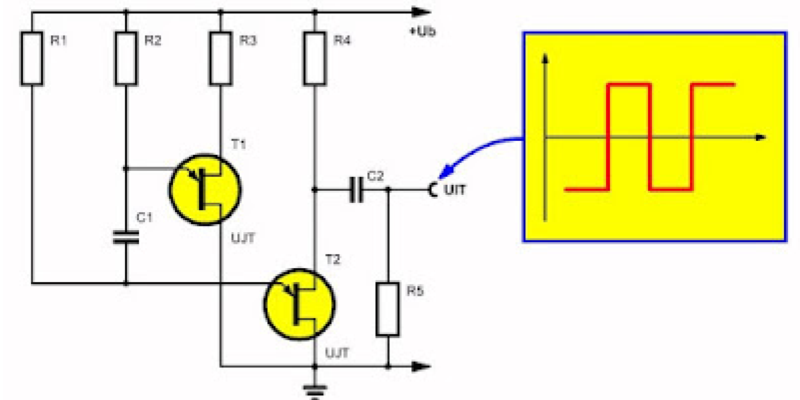
nodig hebt.



Een zaagtandgenerator met een UJT. (© 2018 Jos Verstraten)

Twee UJT's vormen een rechthoekgenerator

In onderstaande figuur worden twee identieke UJT's toegepast in een rechthoekgenerator. Bij het inschakelen van de voedingsspanning zal de emitter van T2 via de weerstand R1 met de voedingsspanning worden verbonden en deze halfgeleider gaat geleiden. De uitgangsspanning wordt nul. De condensator C1 hangt met zijn onderste plaat aan de massa via de geleidende T2. De bovenste plaat gaat via de weerstand R2 opladen uit de voedingsspanning. Na een bepaalde tijd is de emitterspanning van de UJT T1 zover gestegen dat deze halfgeleider ontsteekt. De bovenste plaat van de condensator gaat dan opeens naar de massa. Deze negatieve spanningssprong verschijnt ook op de onderste plaat, waardoor T2 onmiddellijk gaat sperren. De uitgang wordt gelijk aan de voedingsspanning. Nu ligt de bovenste plaat van de condensator C1 aan de massa en gaat de onderste via R1 opladen. Na een bepaalde tijd wordt de emitterspanning van T2 zo groot dat deze gaat geleiden en de schakeling klapt om.
Besluit: de condensator C1 wordt afwisselend via R1 en via R2 opgeladen tot de doorslagspanning van de UJT's. Op de uitgang verschijnt een rechthoekvormige spanning waarvan de frequentie wordt bepaald door de waarde van de condensator C1 en de weerstanden R1 en R2. U kunt de aan/uit-verhouding van de uitgangspuls variëren door de verhouding tussen R1 en R2 regelbaar te maken.

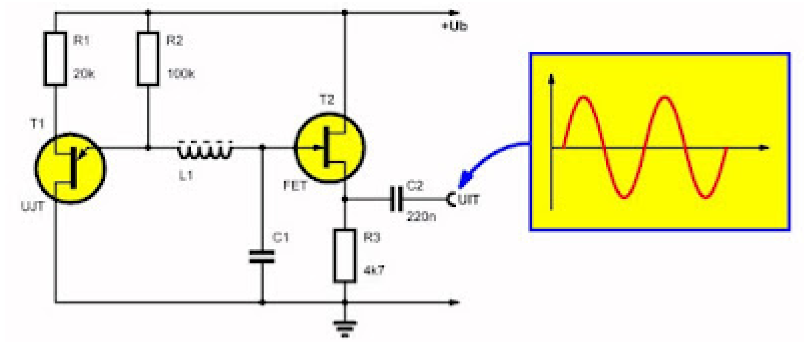


Een rechthoekgenerator met twee identieke UJT's. (© 2018 Jos Verstraten)

Een sinusgenerator met een UJT

Als een condensator met de juiste timing wordt geladen en ontladen via een zelfinductie ontstaat over de condensator een sinusvormige spanning. Voorwaarde is dat de periode van het ontladen en laden gelijk is aan de resonantiefrequentie van de LC-kring. Van dit principe wordt in onderstaand schema gebruik gemaakt voor het samenstellen van een sinusgenerator die tot ongeveer 50 kHz kan werken. De UJT T1 is verantwoordelijk voor het laden en ontladen van de condensator C1 via de spoel L1. De FET T2 zorgt voor het afsluiten

van de condensator met een hoge weerstand, zodat de belasting de werking van de schakeling niet beïnvloedt.

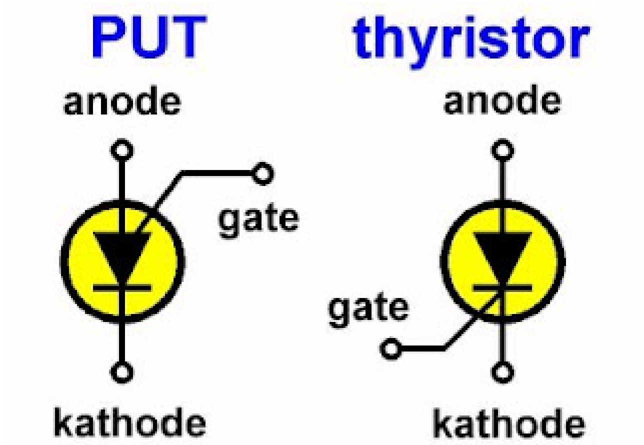


Een sinusgenerator met een UJT. (© 2018 Jos Verstraten)

De PUT, programmable uni-junction transistor

Wat is een PUT?

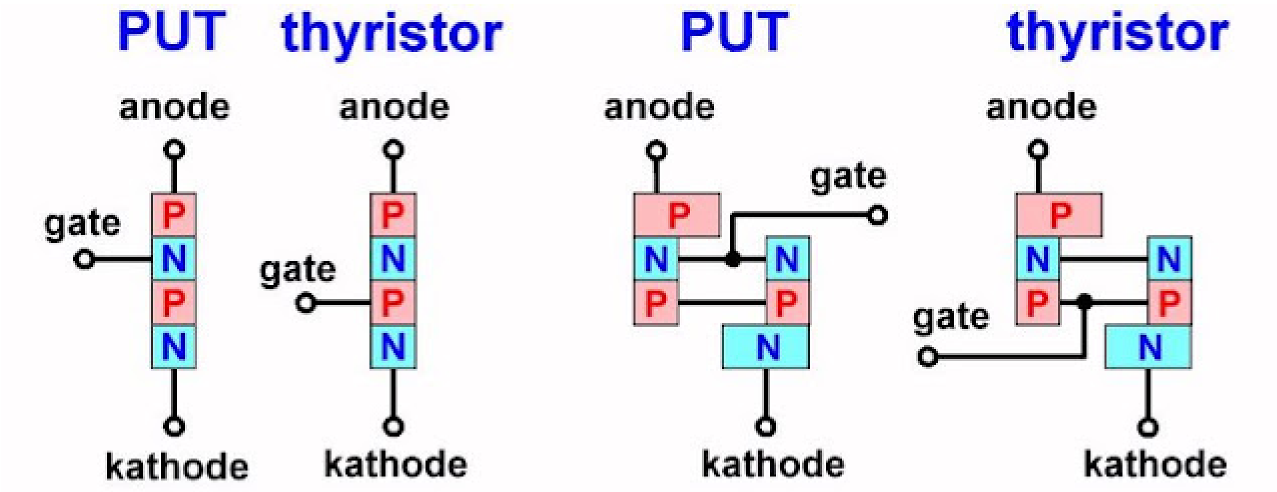
PUT is een afkorting en staat voor de Engelse woorden '**P**rogrammable **U**ni-junction **T**ransistor', een benaming die weinig toelichting behoeft. Een PUT vertoont in zijn gedrag en werking een vrij sterke overeenkomst met de UJT. Qua opbouw is de PUT echter sterk verschillend van de UJT. De opbouw is namelijk vergelijkbaar met die van de thyristor. Allereerst even het symbool van de PUT, dat in onderstaande figuur links is weergegeven. In dezelfde figuur is tevens het thyristorsymbool getekend (rechts) om de treffende gelijkenis duidelijk te laten uitkomen.



Vergelijking van de symbolen van PUT (links) en van thyristor (rechts). (© 2018 Jos Verstraten)

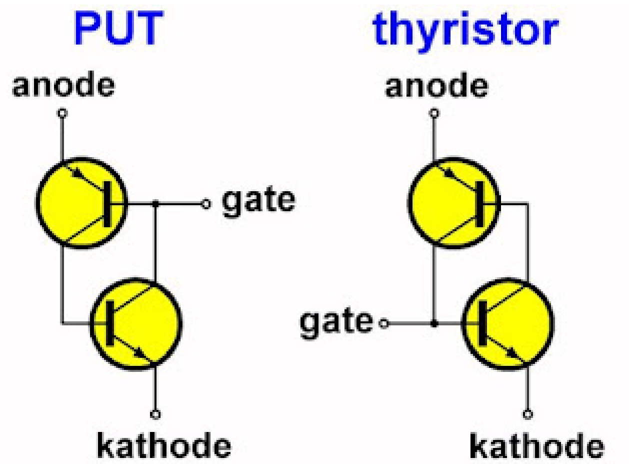
Samenstelling van een PUT

Ook de PUT bezit een stuurelektrode maar die zit, in tegenstelling tot die van de thyristor, aan de anodekant van de diode. Onderstaande figuur geeft de opbouw van de halfgeleiderlagen in een PUT en in een thyristor weer. De vierlagen-structuur van de thyristor kan worden ontleed in twee drielagen-structuren, die uiteindelijk twee transistoren voorstellen, die op een speciale manier met elkaar gekoppeld zijn. Welnu, voor de PUT gaat een vrijwel identieke redenering op. Beide ontledingen zijn rechts in dezelfde figuur voorgesteld. Ook in deze figuur dringt zich weer de vergelijking met de thyristor op.



De lagen-structuren van PUT (links) en thyristor (rechts) vergeleken.
(© 2018 Jos Verstraten)

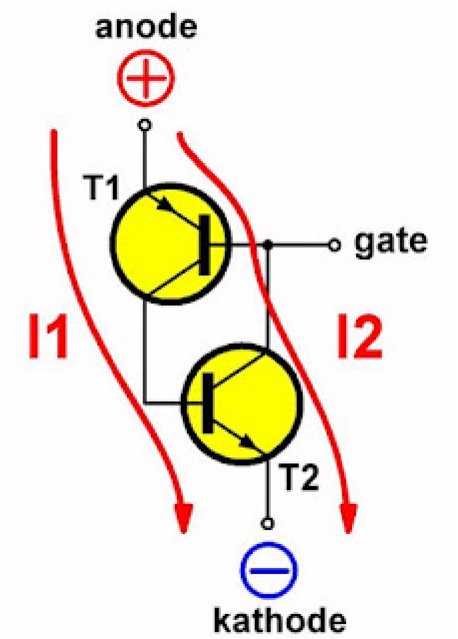
Doormidden delen van de beide middelste lagen levert de beide gewenste drielagen-structuren op. Het verschil zit 'm alleen in de aansluiting van de gate (= poort) elektrode. Die zit bij de thyristor aan de derde (p) laag en bij de PUT aan de tweede (n) laag. Zoals geschreven vormen de beide stukken van drie lagen telkens twee transistoren. Hoe dat er in de vorm van een elektrisch schema uitziet, is op te maken uit onderstaande figuur waarbij de thyristor weer als vergelijkingsmateriaal is opgevoerd.



De drielagen-structuren kunnen worden voorgesteld door een stel complementaire transistoren, links voor de PUT, rechts voor de thyristor. (© 2018 Jos Verstraten)

Werking
Een thyristor wordt in geleiding gebracht door de onderste transistor (npn) open te sturen door een spanning tussen gate en kathode aan te leggen. Er ontstaat dan een soort van lawine-effect, beide transistoren houden elkaar immers in geleiding. Bij de PUT gebeurt iets analoogs. Hier wordt echter niet de onderste, maar de bovenste (pnp) transistor open gestuurd. Hoe dat gebeurt kan het best worden verklaard aan de hand van onderstaande figuur, waarin de stroomloop door de PUT met twee pijlen is aangegeven. De anode is aangesloten op de plus van de voeding, de kathode op de min. De pn-overgang tussen anode en gate is in feite niets meer dan de gewone basis/emitter-diode van een transistor. Laat u er in de richting van de emitterpijl een stroom doorheen lopen, dan gaat de transistor T1 open. Om dit te doen is het voldoende om een spanningsverschil van 0,5 V à 0,6 V aan te leggen tussen de gate (basis van T1) en de anode (emitter van T1). Gaat T1 open, dan zal er ook een stroom door diens collector gaan lopen, maar die stroom kan nergens anders naar toe dan naar de basis van T2. Die basisstroom van T2 zorgt ervoor dat ook deze transistor open gaat. Maar, de collector van T2 is op zijn beurt weer verbonden met de basis van T1, zodat de basisstroom van T2 de richting van de rechter pijl volgt. Ook hier ontstaat dus het bekende lawine-effekt, dat zowel T1 als T2 in verzadiging stuurt en ervoor zorgt dat er tussen

anode en kathode een lage weerstand ontstaat. Doorgaans is deze weerstand 3 Ω of lager.



De twee pijlen geven de stroomrichtingen aan van de stromen door een geleidende PUT. (© 2018 Jos Verstraten)

Het programmeerbare aan de PUT

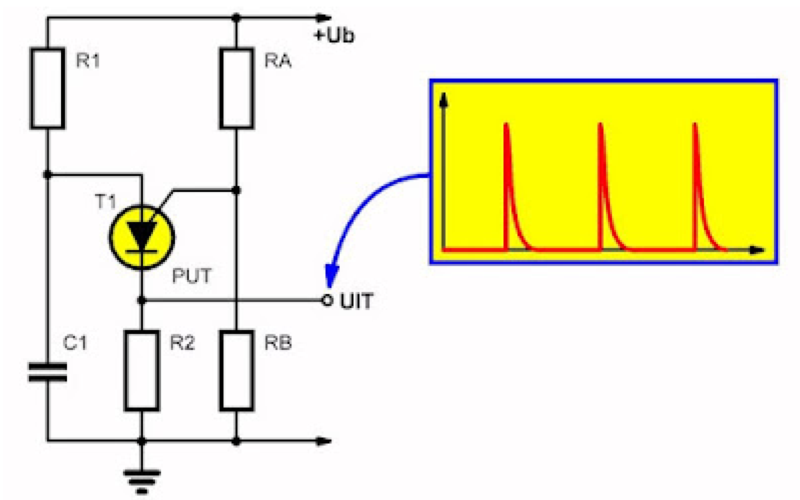
Bij de bespreking van de UJT werd duidelijk dat de UJT triggert (open gaat), wanneer de spanning op diens emitter een waarde heeft bereikt die gelijk is aan een vast percentage van de voedingsspanning. Dit percentage ligt tussen 50 % en 70 %. Deze waarde is onveranderlijk en ligt besloten in het type UJT. Nu blijkt meteen waarom men de naam 'programmeerbare' UJT voor de PUT heeft gekozen, want u kunt bij de PUT de triggerspanning op een willekeurig punt vastleggen en wel door twee externe weerstanden. In het schema van onderstaande figuur zijn dat de weerstanden RA en RB. De triggerspanning wordt bepaald door de eenvoudige formule:

$\eta = (RB / [RA + RB]) \cdot 100\ \%$

Als RA gelijk is aan RB, dan is η dus gelijk aan 50 % van de voedingsspanning.

Werking van de schakeling

Via weerstand R1 laadt de condensator C1 zich langzaam op. De spanning op C1 neemt dus toe, totdat die gelijk wordt aan de triggerspanning. Op dat moment gaat de PUT open. De condensator C1 gaat zich nu snel ontladen via de PUT en diens kleine kathodeweerstand R2. Over R2 ontstaat door de ontlaadstroom een puls. Deze puls kan als uitgangssignaal worden gebruikt van de PUT-oscillator. Door de verhouding van de weerstanden RA en RB te variëren kunt u de grootte van de uitgangspulsen instellen. Door R1 te variëren kunt u de frequentie instellen.

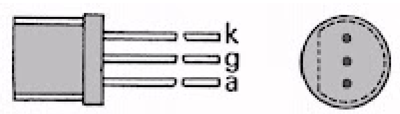


Beschikbare typen van PUT's

D13T1 en 2N6027
Beide gelijkwaardige halfgeleiders zijn silicium PNPN programmeerbare uni-junction transistoren voor universeel gebruik.

- **Richtprijs:** ongeveer € 1,63
- **Behuizing:** TO-982
- **Aansluitgegevens:** zie onderstaande figuur
- **Maximale anode-kathode spanning:** 40 V
- **Maximale continue anodestroom:** 150 mA
- **Maximale piek anodestroom:** 1 A
- **Minimale noodzakelijke anodestroom voor starten van lawine-effekt:** 2 μA
- **Maximale gatestroom:** 20 mA
- **Maximaal vermogen:** 300 mW

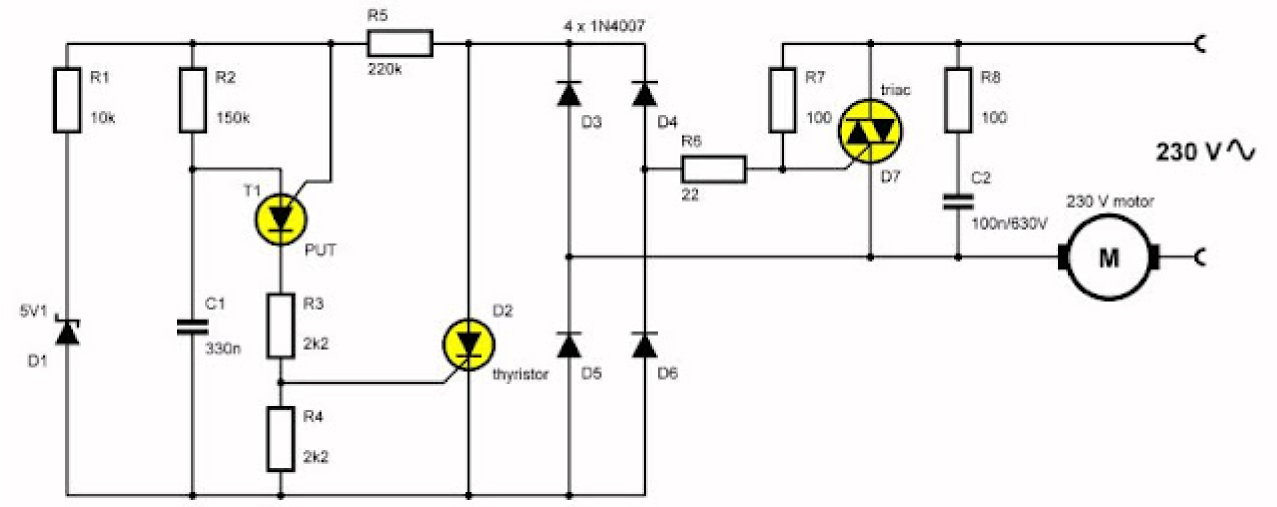
D13T2 en 2N6028
Ook dit zijn gelijkwaardige silicium PNPN programmeerbare uni-junction transistoren voor toepassingen in tijdschakelingen waarbij lange perioden moeten worden gerealiseerd. In feite zijn dit geselecteerde versies van de D13T1 en 2N6027, waarbij als selectiecriterium een zo laag mogelijke minimale anodestroom voor ontsteking geldt. De minimale noodzakelijke anodestroom voor het starten van het lawine-effekt bedraagt bij deze typen slechts 150 nA.



Aansluitgegevens van de D13T1, D13T2, 2N6027 en 2N6028. (© ON Semiconductor)

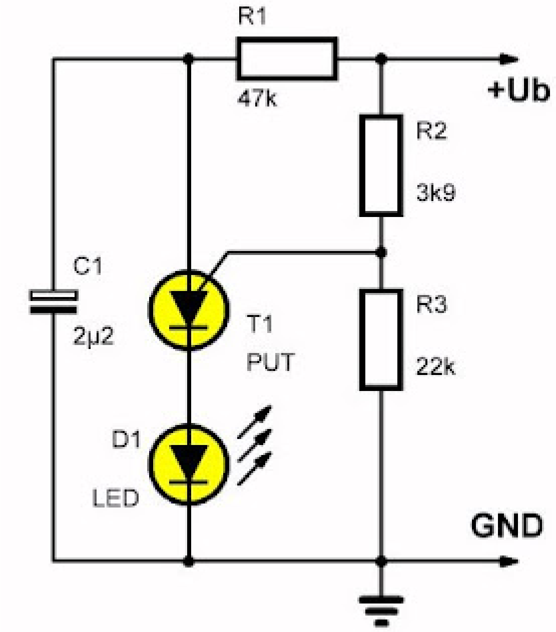
Voorbeeldschakelingen met PUT's

De PUT als regelaar van een wisselspanningsmotor
In onderstaande figuur is een schema getekend waarmee u een 230 V wisselspanningsmotor in vermogen/toerental kunt regelen. De motor wordt gestuurd door de triac D7. Deze krijgt zijn gatepulsen uit een schakeling waarin de PUT T1 de hoofdrol speelt. Deze halfgeleider is geschakeld als pulsgenerator, die de thyristor D2 stuurt. Deze levert via de bruggelijkrichter D3-D4-D5-D6 de gatepulsen voor de triac D7. Als u R2 vervangt door een potentiometer kunt u het toerental van de motor regelen. De schakeling werkt volgens een primitief principe van frequentieregeling. Afhankelijk van de frequentie van de pulsen die de PUT levert zal de motor niet alle halve perioden van de netspanning worden gestuurd, maar slechts om de twee, om de drie, etc. Daardoor gaat het in de motor gestopte vermogen dalen en dus ook het toerental. Deze schakeling gaat uit dat de motor een zware mechanische belasting moet ronddraaien. Deze belasting dient dan als vliegwiel, die het gepulste sturen van de motor afvlakt.



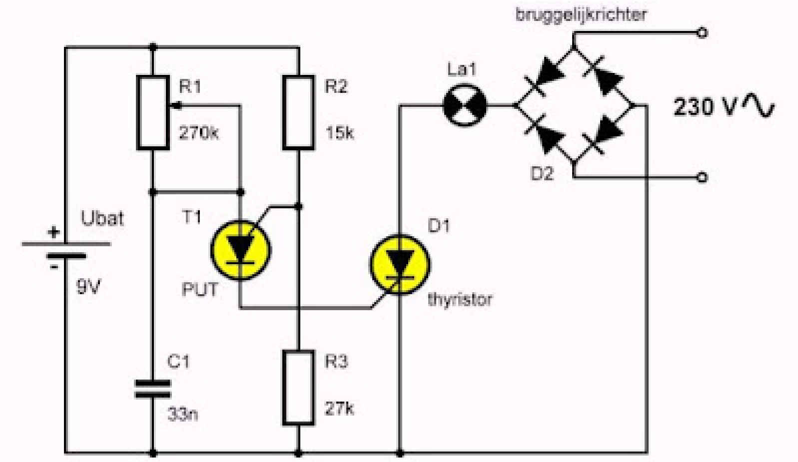
Een PUT in een schakeling van een motorregeling. (© 2018 Jos Verstraten)

Een PUT als knipperlicht
De schakeling van onderstaande figuur laat een LED met korte, felle flitsjes oplichten. De werking zal wel duidelijk zijn. De PUT T1 slaat door als de condensator C1 is opgeladen tot de door de weerstandsdeler R2/R3 voorgeschreven spanning. De condensator wordt dan opeens ontladen door de PUT en de LED D1 ontvangt een grote piekstroom.



Met deze schakeling gaat een LED felle lichtflitsen geven.
(© 2018 Jos Verstraten)

Een lampdimmer met een PUT
Als laatste voorbeeldschakeling ziet u in onderstaande figuur een eenvoudige lichtdimmer met een PUT als besturend element. Het enige nadeel van de schakeling is dat u een 9 V batterijtje nodig hebt om de PUT te laten werken. Maar gelet de hoge weerstandswaarden in dat deel van de schakeling gaat zo'n batterij erg lang mee. De werking is altijd identiek. De condensator C1 laadt op tot de door R2/R3 bepaalde spanning, de PUT slaat door en levert de ontsteekstroom voor de thyristor D1. De thyristor en de lamp zijn via een bruggelijkrichter D2 verbonden met de netspanning, zodat de stroom altijd in dezelfde richting door de thyristor kan lopen.



Een lampdimmer met een PUT als besturend element.
(© 2018 Jos Verstraten)